

太湖沉水植物光补偿深度反演及影响因子分析

宋玉芝¹, 王 敏¹, 赵巧华¹, 张运林², 秦伯强²

(1.南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 2.中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘 要:水生植物在浅水湖泊生态系统中具有十分重要的作用,根据太湖常见的3种沉水植物苦草、狐尾藻、金鱼藻的光合速率与辐照度的关系,反演3种沉水植物的光补偿深度在太湖的空间分布,并根据水生植物的调查资料和文献资料来检验反演的效果。在此基础上,通过多元回归分析和因子方差贡献大小分析,探讨有机悬浮颗粒物、无机悬浮颗粒物、叶绿素a 3种生态因子对沉水植物光补偿深度的影响。结果表明,3种沉水植物的光补偿深度总体上表现出从太湖东侧向湖心区、河口区及太湖西南方向逐渐减小的态势,对于特定的湖区,3种沉水植物的光补偿深度大小基本为苦草>金鱼藻>狐尾藻;3种沉水植物光补偿深度分别与有机悬浮颗粒物、无机悬浮颗粒物以及叶绿素a 3因子呈显著回归关系。有机悬浮颗粒物、叶绿素a对3种沉水植物光补偿深度有显著的负作用,无机悬浮颗粒物有微弱的负作用,3因子对沉水植物光补偿深度影响大小依次是有机悬浮颗粒物>叶绿素a>无机悬浮颗粒物。

关键词:沉水植物;光补偿深度;影响因子;太湖

中图分类号:X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)10-2099-07

Inversion of Compensation Depth of Three Submerged Macrophytes and Its Influential Factors in Taihu Lake

SONG Yu-zhi¹, WANG Min¹, ZHAO Qiao-hua¹, ZHANG Yun-lin², QIN Bo-qiang²

(1. College of Environmental Science & Engineering, Nanjing University of Science Information & Technology, Nanjing 210044, China;
2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Aquatic macrophytes play a very important role in the shallow lake ecosystem. In this work we investigated the spatial distribution of retrieval light compensation depth of three submerged macrophytes including *Vallisneria natans*, *Ceratophyllum demersum*, *Myriophyllum spicatum* commonly found in Taihu Lake, which was based on the relationship between photosynthetic rate of submerged macrophytes and light intensities. Inversion effects were obtained by comparing the distributing results with literature data. Furthermore, we discussed the impact of inorganic suspended particulate matter, organic suspended particulate matter, and chlorophyll a on light compensation depth of submerged plants by means of multivariate regression analysis and variance analysis. The results showed that the light compensation depth of three species of submerged macrophytes gradually decreased from the east epigeal zone, to the central zone, estuary and the southwest zone of Taihu Lake. In some particular regions, the light compensation depth of three submerged macrophytes was in the order: *V. natans*>*C. demersum*>*M. spicatum*. It was discovered that significant regression relationship between light compensation depth of submerged plants and ecological factors including organic suspended particulate matter, inorganic suspended particulate matter, and chlorophyll a. Organic suspended particulate matter, and chlorophyll a had a significant negative effect on light compensation depth of submerged macrophytes, but inorganic suspended particulate matter having a weak positive effect. The effects of three factors on light compensation depth of submerged macrophytes followed an order of organic suspended particulate matter>chlorophyll a>inorganic suspended particulate matter. Hence, this research provided some meaning results, which should be a potential reference for restoration and rehabilitation of submerged macrophytes in Taihu Lake.

Keywords: submerged macrophyte; light compensation depth; influence factor; Taihu Lake

收稿日期:2011-04-01

基金项目:国家自然科学基金项目(41071341);国家自然科学基金重点项目(40730529);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07101-013-03);湖泊与环境国家重点实验室开放基金

作者简介:宋玉芝(1970—),女,河南信阳人,博士,副教授,主要研究方向为污染环境的生态修复。E-mail:syz70@nuist.edu.cn

随着经济的快速发展,太湖的富营养化程度日趋严重,“水华”频繁暴发,湖泊生态系统退化,湖泊服务功能受到影响^[1]。沉水植物是水生生态系统中的重要组成部分,对水体环境有重要影响^[2-4],水生植被的恢复技术已被认为是湖泊富营养化治理的关键^[3-5]。但野外实践结果表明,在富营养化湖泊中,沉水植物却难以恢复并形成稳定的群落^[6]。有人认为,富营养化水体高浓度的营养盐是导致沉水植物难恢复的直接原因^[7]。然而,直接利用高浓度的营养盐进行室内水培实验,受试的每种沉水植物均生长良好,并对污水有显著的净化作用^[4,8],这使得人们把注意力集中在水深和 underwater 光照强度对沉水植物的影响上^[9-11]。近年来,关于太湖水下光场和沉水植物研究已比较多^[12-14],而关于太湖沉水植物光补偿深度的空间分布研究还未见报道。因此,对太湖地区沉水植物光补偿深度及其影响因子的研究,可为太湖污染的治理及沉水植物恢复重建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样点分布及监测指标

在水草生长季节共设 67 个采样点,采样点覆盖整个太湖(图 1)。采样时天气晴好,平均风速 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,最大风速不超过 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。各个测点监测的指标有:辐照度、光衰减系数、有机悬浮颗粒物、无机悬浮颗粒物、叶绿素 a ^[15-16]。由于 21 号点部分数据丢失,来自于 66 个采样点的数据参与计算。

1.2 光补偿深度的计算

1.2.1 太湖不同经纬度光补偿深度的计算

沉水植物光补偿深度是指光照强度等于群落(或种群)昼夜光补偿点的水深^[17]。沉水植物以 24 h 为新陈代谢周期,沉水植物在湖泊中能生长的最深深度定义为沉水植物的光补偿深度,即在这一深度上,沉水植物 1 d 的呼吸作用消耗的与光合作用合成的有机物相等,即平衡点。

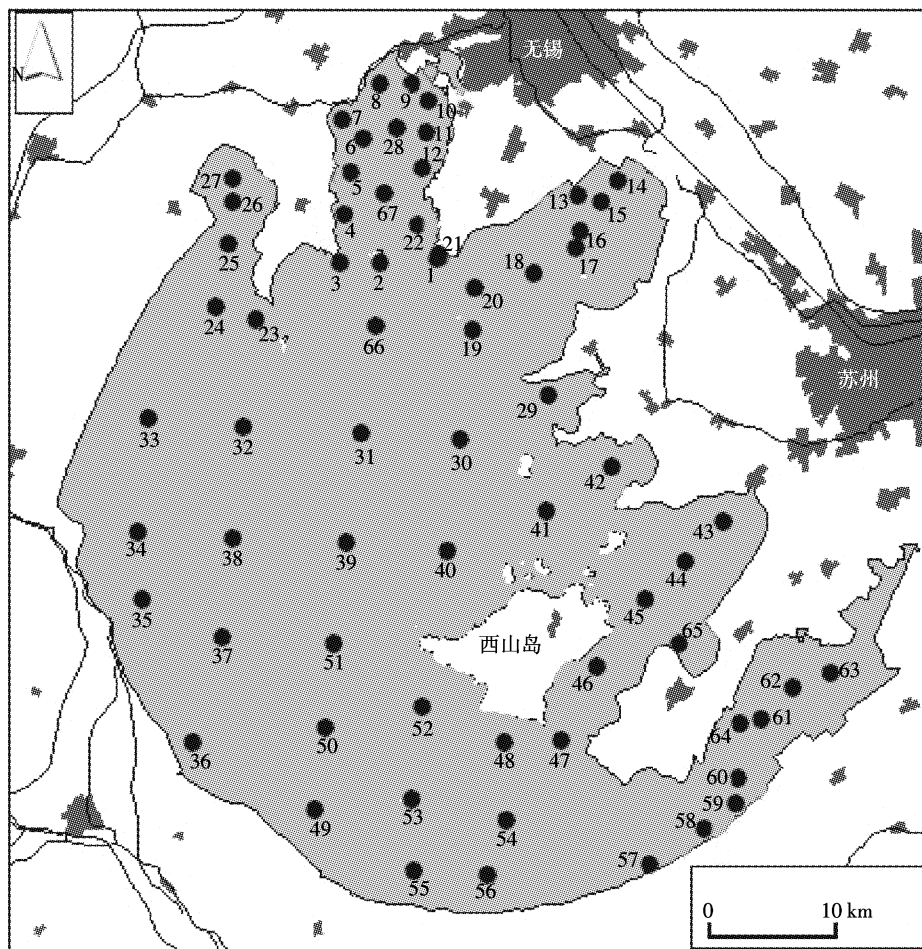


图 1 太湖采样点的分布

Figure 1 Sampling locations in Taihu Lake

经纬度为 x, y 处, 湖水深度为 z 的某点辐照度 (I) 1 d 内随时间的变化用 $I_{(t,z,x,y)}$ 表示, 沉水植物光合速率(以净放氧量为指标, 单位 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) 用 $F_{(I)}$ 表示。对于某点 (z, x, y) 1 d 中某一时刻某沉水植物的光合速率可表示为 $F_{(I)} = F_{[I_{(t,z,x,y)}]} = f_{(t,z,x,y)} \circ$ 函数 $f_{(t,z,x,y)}$ 对时间 t 24 h 求积分:

$$\varphi_{z,x,y} = \int_0^{24} f_{(t,z,x,y)} dt$$

$\varphi_{z,x,y}$ 为该沉水植物在湖中 (z, x, y) 处净光合速率, 若沉水植物在点 (z, x, y) 处生长, 则 $\varphi_{z,x,y} \geq 0$, 由此求出 z 的临界值, 即为该沉水植物的光补偿深度。

为简单起见, 假设在经纬度为 (x, y) 处, 太湖水体表面的辐照度 $I_{(t,20,x,y)}$ 1 d 内随时间的变化服从抛物线模型, 则它的表达式是:

当 $0 \leq t < 6$ 时, $I_{(t,20,x,y)} = 0$

当 $6 \leq t < 18$ 时, $I_{(t,20,x,y)} = -33.333t^2 + 800t - 3\ 600$

当 $18 \leq t < 24$ 时, $I_{(t,20,x,y)} = 0$

早上 6:00 和下午 18:00 太湖水面辐照度为 0, 正午时候达到最大 $1\ 200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ [12]。由太湖水面辐照度经比尔定律可算出距太湖水面深度为 z 处的光照强度 $I_{(t,z,x,y)}$ 为:

$$I_{(t,z,x,y)} = I_{(t,20,x,y)} e^{-z \times K_d}$$

因为太湖是浅水湖泊, 水体分层不明显, 所以假设 K_d 在具体的经纬度 (x, y) 处是定值, 与波长 λ 、时间 t 和水深 z 无关。

当水温稳定在 $20\ ^\circ\text{C}$ 左右时, 光照强度与 3 种沉水植物(苦草、狐尾藻、金鱼藻)净光合速率参照已有的研究结果 [18-20] 得到的函数表达式见表 1, 根据表 1 中函数利用 Mathematic 运算求解, 求出 66 个测点 3 种沉水植物光补偿深度。

1.2.2 太湖中沉水植物光补偿深度的空间分布

利用专业地理信息系统软件 ArcGIS 9.2, 在已生成的 1:50 000 太湖轮廓图及样点分布图的基础上, 以 66 个测点沉水植物光补偿深度为变量, 利用 Kriging 插值法进行内插运算, 模拟生成太湖 3 种沉水植物光补偿深度空间分布格局图。

1.3 沉水植物光补偿深度影响因子的统计分析

利用 Excel 反演出的 66 个采样点沉水植物光补偿深度与有机悬浮颗粒物、无机悬浮颗粒物、叶绿素 a 进行多元线性回归分析, 求出回归方程。在此基础上, 根据统计原理算出这 3 个因子各自的方差贡献, 分析各个因子对沉水植物光补偿深度的影响程度。

2 结果与分析

2.1 沉水植物光补偿深度的反演

图 2 是太湖中苦草、狐尾藻、金鱼藻 3 种沉水植物光补偿深度的分布格局。苦草的光补偿深度全湖平均值为 $122.4\ \text{cm}$, 在东太湖、七都的部分水域为 $220\sim 460\ \text{cm}$, 其中东太湖湾入口处达全湖最大值为 $380\sim 460\ \text{cm}$; 在竺山湾、贡湖湾、胥口湾、环西山岛附近水域为 $100\sim 180\ \text{cm}$, 在光福湾水域为 $180\sim 220\ \text{cm}$, 在梅梁湾、湖心区北部为 $60\sim 100\ \text{cm}$, 在西岸区、西南区、湖心区南部水域一带为 $20\sim 60\ \text{cm}$, 其中在西南河口区达全湖最小值为 $20\sim 40\ \text{cm}$ 。狐尾藻的光补偿深度的全湖平均值为 $86.67\ \text{cm}$, 在东太湖入口处达全湖最大值 ($220\sim 320\ \text{cm}$), 在七都部分水域、环西山岛附近、光福湾东太湖一带水域为 $140\sim 220\ \text{cm}$, 在竺山湾、贡湖湾水域为 $60\sim 100\ \text{cm}$, 在梅梁湾、湖心区部分水域为 $40\sim 60\ \text{cm}$, 在西岸区、湖心区南侧、西南侧水域为 $20\sim 40\ \text{cm}$ 。金鱼藻的光补偿深度全湖平均值为 $91.97\ \text{cm}$, 在东太湖入口处为全湖最大值 ($220\sim 340\ \text{cm}$), 在光福湾、环西山岛附近、七都部分水域、东太湖水域一带为 $140\sim 220\ \text{cm}$, 在竺山湾、贡湖湾、胥口湾水域为 $80\sim 120\ \text{cm}$, 在梅梁湾、西岸区、湖心区大部分水域为 $40\sim 80\ \text{cm}$, 在湖心区南侧、西南区为 $20\sim 40\ \text{cm}$, 达全湖最小值。苦草、狐尾藻、金鱼藻的光补偿深度的空间分布格局均表现出从太湖东侧向西南侧逐渐减少的规律(图 2), 但 3 种沉水植物在太湖各湖区的光补偿深度存在差异, 即在特定的湖区, 它们的光补偿深度大小是苦草 > 金鱼藻 > 狐尾藻。这与这 3 种沉水植物适应低光的能力是一致的, 即适应弱光的能力为苦草 > 金鱼藻 > 狐尾藻。

根据 3 种沉水植物光补偿深度空间分布格局, 结

表 1 3 种沉水植物光合速率与光照强度的拟合方程 ($I/\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, $F/\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)

Table 1 Fitted equation about relation between photosynthetic rate of submerged macrophytes and light intensities ($I/\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, $F/\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)

沉水植物 Submerged macrophyte	拟合方程 Fitted equation	I 的范围 The range of Value I
苦草 (<i>V. natans</i>)	$F = -1 \times 10^{-10} I^4 + 3 \times 10^7 I^3 - 0.000\ 3 I^2 + 0.092\ 7 I - 0.847$	$0 \leq I \leq 1\ 200$
狐尾藻 (<i>M. spicatum</i>)	$F = -3 \times 10^{-11} I^4 + 9 \times 10^8 I^3 - 0.000\ 1 I^2 + 0.067\ 8 I - 1.780$	$0 \leq I \leq 1\ 200$
金鱼藻 (<i>C. demersum</i>)	$F = 2 \times 10^{-10} I^4 - 3 \times 10^8 I^3 - 2 \times 10^{-5} I^2 + 0.051\ 1 I - 1.234$	$0 \leq I \leq 1\ 200$

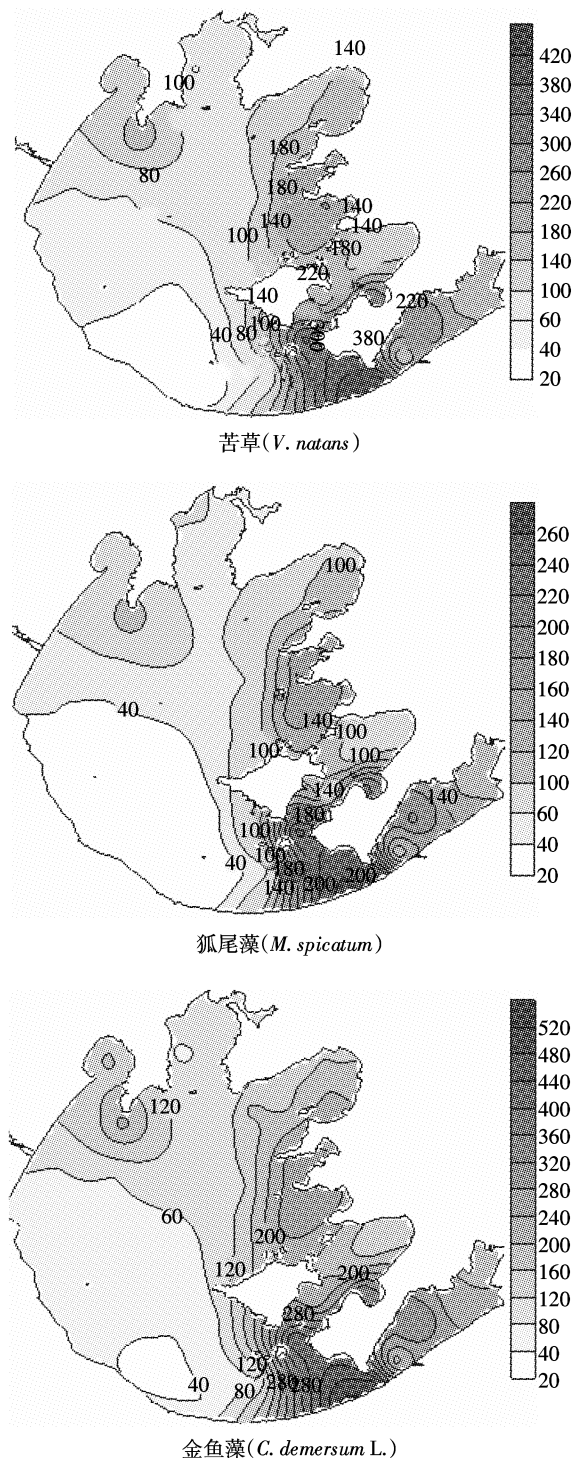


图2 3种沉水植物光补偿深度等值线(cm)

Figure 2 Isopleths map of light compensation depth of three submerged macrophyte(cm)

合太湖各湖区的平均水深^[13]可知:由于光的限制,在梅梁湾、竺山湾、西南区、湖心区、西岸区等水域苦草难以生存,在环西山岛附近、七都水域、东太湖入口处、东太湖等水域苦草能生存,在东太湖入口处存在的可能性

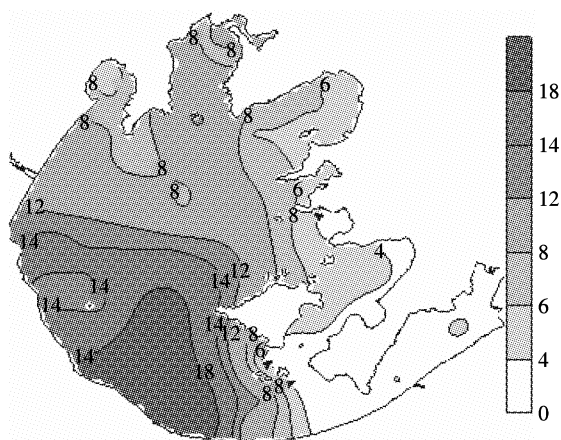
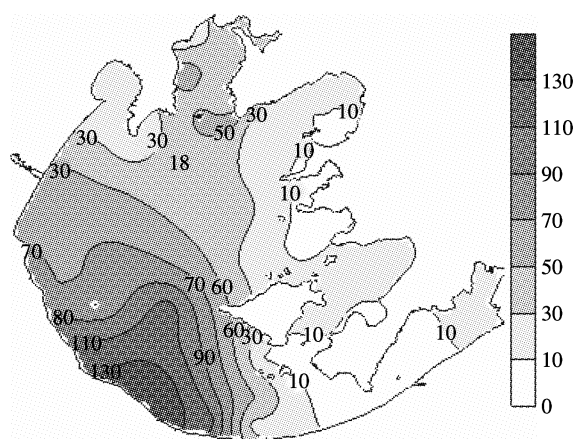
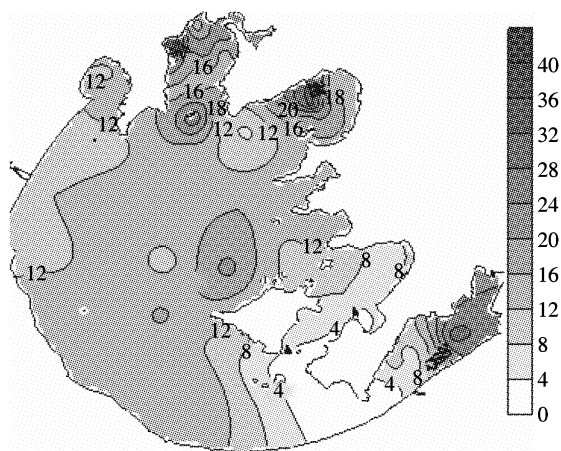
最大;狐尾藻在东太湖入口处、七都水域附近、东太湖、光福湾可能存在,其他湖区存在的可能性较小;金鱼藻主要分布在光福湾、环西山岛附近、七都水域、东太湖地区,其他水域分布的可能性较小。这与近年来太湖地区沉水植物的调查结果以及文献记载基本上吻合^[14]。文献资料表明^[14]:秋季在太湖湖北部两湾区、西岸区、湖心区、西南区没有发现沉水植物苦草。在竺山湾、梅梁湾、西岸区、西南区、湖心区没有狐尾藻、金鱼藻的分布。但反演的结果与个别湖区某些区域水草分布的调查结果不完全一致,这可能是用各湖区的平均水深代替各湖区的实际水深造成的,并且本文仅讨论光对3种沉水植物在太湖的空间分布的限制作用,还有其他环境因子对沉水植物的分布也有影响^[8,21]。

2.2 沉水植物光补偿深度的影响因子分析

光在湖水中的衰减主要是由纯水、黄色物质、悬浮颗粒物及浮游植物的吸收和散射等造成的,其中纯水的吸收和散射所造成的光的衰减是所有湖水所共有的,是湖水衰减系数的本底(又称背景值)^[13]。因此,湖水中不同位点光衰减系数的变化是由溶解物质、悬浮颗粒物和浮游植物种类等因素引起的。基于此,本文分析太湖水体有机悬浮颗粒物、无机悬浮颗粒物、叶绿素a对3种沉水植物光补偿深度的影响。

2.2.1 沉水植物光补偿深度影响因子空间分析

有机悬浮颗粒物的全湖平均值为 $8.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在东太湖、七都水域区达全湖最小值 $0 \sim 4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在贡湖湾部分水域、胥口湾部分水域为 $4 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在梅梁湾水域、湖心区部分水域为 $6 \sim 12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在西南区、西岸区、湖心区南部水域为 $12 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其中西南区的河口地带达全湖最大值 $18 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图3)。无机悬浮物的全湖平均值为 $37.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在东太湖入口处水域、光福湾、贡湖湾部分水域一带达全湖最小值 $0 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在竺山湾、贡湖湾大部分水域、胥口湾、环西山岛附近大部水域为 $10 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在梅梁湾、湖心区北部水域为 $30 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在西岸区、湖心区南部水域和西南区水域为 $50 \sim 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其中西南区达全湖最大值 $130 \sim 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图4)。叶绿素a的全湖平均值为 $13.80 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,在东太湖湖湾入口处达全湖最小值 $0 \sim 4 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,在胥口湾、环西山岛、七都水域附近为 $4 \sim 12 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,在东太湖水域为 $12 \sim 24 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,在西岸区附近水域为 $8 \sim 12 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,在梅梁湾大部分水域、贡湖湾部分水域为 $16 \sim 24 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,在西南区、湖心区、光福湾为 $12 \sim 16 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,此部分所占的湖区面积最大(图5)。

图3 有机悬浮颗粒物等值线($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)Figure 3 Isopleths map of organic suspended particulate matter($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)图4 无机悬浮颗粒物等值线($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)Figure 4 Isopleths map of inorganic suspended particulate matter($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)图5 叶绿素a等值线($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)Figure 5 Isopleths map of chlorophyll a($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)

有机悬浮颗粒物和无机悬浮颗粒物在空间上的分布格局与3种沉水植物光补偿深度的分布格局,基本上存在相反分布态势。叶绿素a的空间分布格局不如有机悬浮颗粒物、无机悬浮颗粒物与3种沉水植物光补偿深度等值线图的相位相似。

2.2.2 沉水植物光补偿深度影响因子统计分析

表2是利用Excel对3种沉水植物的光补偿深度分别和有机悬浮颗粒物、无机悬浮颗粒物以及叶绿素a 3因子做多元回归后得出的回归方程。其中 H 表示沉水植物的光补偿深度,单位 cm ;OSS表示有机悬浮颗粒物,单位 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;ISS表示无机悬浮颗粒物,单位是 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;Chl.a表示叶绿素a,单位 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

由表2可知,3种沉水植物各自的复相关系数 $R=0.8$,并且 $F>F(3,62)$,都能通过 F 检验,说明这3种沉水植物光补偿深度都与有机悬浮颗粒物、无机悬浮颗粒物以及叶绿素a 3因子呈回归关系。由OSS、ISS、Chl.a 3因子的系数可知,OSS和Chl.a对3种沉水植物光补偿深度有负的作用,OSS、Chl.a增大,3种沉水植物的光补偿深度 H 将减小;ISS对3种沉水植物光补偿深度有正的作用。

表3是利用Excel对OSS、ISS、Chl.a 3因子对3种沉水植物光补偿深度各自的方差贡献大小进行分析所得的结果。由表3可知,OSS、ISS、Chl.a 3因子对沉水植物光补偿深度的影响程度的大小依次是 $\text{OSS}>\text{Chl.a}>\text{ISS}$ 。此外,ISS对沉水植物的光补偿深度的影响很微弱,通不过 F 检验。由此可见,OSS、Chl.a对3种沉水植物的光补偿深度影响较大,而ISS的影响较小。

3 讨论

水下光照强度是制约沉水植物成活及生长的主要因子之一,在水体透明度较低、水下光照不足湖区,沉水植物难以生存^[15,20]。不同沉水植物光合作用对光照强度要求不一致,研究表明,苦草、金鱼藻、狐尾藻3种沉水植物光补偿深度总体上表现出从太湖东侧向湖心区、河口区及太湖西南方向逐渐减小的态势,在特定的湖区,光补偿深度依次为苦草>金鱼藻>狐尾藻,这与太湖沉水植物实际的空间分布基本一致。事实上,只有在实际水深小于或等于光补偿深度的水域,沉水植物才有可能生长;而在那些实际水深大于光补偿深度的水域,沉水植物则无法生长。浅水湖泊中,沉水植物光补偿深度小于实际水深的根本原因是水下光照强度的不足,而水下光强主要与水体悬

表 2 3 种沉水植物光补偿深度与 3 个因子的多元回归分析

Table 2 Multivariate regression analysis about the relation between light compensation depth of submerged plants and three influential factors

沉水植物 Submerged macrophyte	拟合方程 Fitted equation	Multiple R	F	F(3,62)
苦草(<i>V. natans</i>)	$H=-12.21OSS+0.08ISS-2.37Chl.a+259.09$	0.80	35.57	2.75
狐尾藻(<i>M. spicatum</i>)	$H=-8.64OSS+0.05ISS-1.68Chl.a+183.47$	0.80	35.58	
金鱼藻(<i>C. demersum</i>)	$H=-9.17OSS+0.06ISS-1.78Chl.a+194.67$	0.80	35.57	

表 3 3 种沉水植物光补偿深度影响因子方差贡献

Table 3 Variance analysis about light compensation depth of three species of submerged plants

影响因子	苦草(<i>V. natans</i>)		狐尾藻(<i>M. spicatum</i>)		金鱼藻(<i>C. demersum</i>)		F(1,62)
	因子的方差贡献	Fi	因子的方差贡献	Fi	因子的方差贡献	Fi	
OSS	24 471.52	8.66	12 269.71	8.66	13 815.17	8.66	4
ISS	43.90	0.02	21.98	0.01	24.81	0.01	
Chl.a	18 414.74	6.51	9 234.00	6.51	10 396.61	6.51	

浮物对水下光照的吸收和散射密切相关^[13]。

本研究表明,太湖常见的 3 种沉水植物苦草、金鱼藻、狐尾藻的光补偿深度与 OSS、ISS、Chl.a 3 因子呈回归关系,并随着 OSS 和 Chl.a 浓度的增加,光补偿深度明显减小,这一研究结果和有关文献报道是一致的^[13]。本文研究也表明,随 ISS 增加,沉水植物光补偿深度有所增加但不明显,本文的这一研究结果和有关文献报道不太一致^①,有关文献研究表明^②,水体中 ISS 浓度增加会显著抑制沉水植物的生长,进而影响其生存。可能的原因是 ISS 虽然对进入湖水中的光有吸收和散射作用,造成沉水植物的光补偿深度减少,但由于观测时间选择在晴天风浪相对较小的时间取样,ISS 含量不高,ISS 在这样的浓度范围内不仅对光的影响比较小,且能充当沉水植物的营养源,营养物质越丰富,沉水植物生长越好,造成沉水植物更好地利用光能,使沉水植物光补偿深度增加,至于真正原因还有待于进一步的研究。

太湖是大型的富营养化浅水湖泊,常年受到风浪扰动的影响,水体中悬浮物和藻类浓度(Chl.a)都较高^[13],从而导致沉水植物实际光补偿深度较小,使得在自然状态下恢复沉水植被较为困难。通过人工干预方式,如物理消浪工程和减少水体悬浮物,将水体透明度提高到一定程度,使水体底层有足够强度的光照,满足沉水植物生长对光的需求,有助于实现太湖水环境的生态修复和生态系统的重建。

4 结论

(1)3 种沉水植物的光补偿深度反演结果总体上表现出从太湖东侧向湖心区、河口区及太湖西南方向逐渐减小的态势,3 种沉水植物主要在环西山岛附近、

七都水域、东太湖入口处、东太湖等水域存在,其他水域分布的可能性较小;对于特定的湖区,3 种沉水植物的光补偿深度大小基本上为苦草>金鱼藻>狐尾藻。

(2)有机悬浮颗粒物、无机悬浮颗粒物、叶绿素 a 的空间分布总体上与 3 种沉水植物的光补偿深度空间分布呈相反分布态势。3 种沉水植物光补偿深度都与有机悬浮颗粒物、无机悬浮颗粒物以及叶绿素 a 3 因子呈显著回归关系。OSS 和 Chl.a 对 3 种沉水植物光补偿深度有负作用,ISS 对光补偿深度有微弱的正作用,但影响的程度不大。3 因子对沉水植物光补偿深度的影响程度大小依次是 OSS>Chl.a>ISS。

参考文献:

[1] 秦伯强,王小冬,汤祥明,等.太湖富营养化与蓝藻水华引起的饮用水危机:原因与对策[J].地球科学进展,2007,22(9):896-906.
QIN Bo-qiang, WANG Xiao-dong, TANG Xiang-ming, et al. Drinking water crisis caused by eutrophication and cyanobacterial bloom in Lake Taihu: Cause and measurement[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22 (9): 896-906.

[2] Nurminen L, Horppila J. Life form dependent impacts of macrophyte vegetation on the ratio of resuspended nutrients[J]. *Water Research*, 2009, 43(13): 3217-3226.

[3] 李文朝. 浅水湖泊生态系统的多稳态理论及其应用[J]. 湖泊科学, 1997, 9(2): 97-104.
LI Wen-chao. Multiplicity of stable states in shallow lakes and its application[J]. *Journal of Lakes Sciences*, 1997, 9(2): 97-104.

[4] 雷泽湘,徐德兰,顾继光,等.太湖大型水生植物分布特征及其对湖泊营养盐的影响[J].农业环境科学学报,2008,27(2):698-704.
LEI Ze-xiang, XU De-lan, GU Ji-guang, et al. Distribution characteristics of aquatic macrophytes and their effects on the nutrients of water and sediment in Taihu Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 698-704.

[5] 马剑敏,成水平,贺 锋,等.武汉月湖水生植被重建的实践与启示[J].

- 水生生物学报, 2009, 33(2): 222–229.
- MA Jian-min, CHENG Shui-ping, HE Feng, et al. Practice and implication of establishing aquatic vegetation in lake Yuehu in Wuhan, China[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2009, 33(2): 222–229.
- [6] Qin Bo-qiang. Lake eutrophication: Control countermeasures and recycling exploitation[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(11): 1569–1573.
- [7] Cao T, Xie P, Li Z Q, et al. Physiological stress of high NH_4^+ concentration in water column on the submerged macrophyte *Vallisneria spiralis* L.[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, 82(3): 296–299.
- [8] 孙利芳, 孙一香, 周长芳, 等. 植物组合及水体营养梯度对三种功能性植物生物量累积与分配的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(10): 2370–2376.
- SUN Li-fang, SUN Yi-xiang, ZHOU Chang-fang, et al. Effects of plant species combination and water body nutrient level on the biomass accumulation and allocation of three kinds functional plant[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(10): 2370–2376.
- [9] 李强, 王国祥. 水体泥沙对黑藻幼苗生长发育的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 995–1002.
- LI Qiang, WANG Guo-xiang. Influence of silts on growth and development of *Hydrilla verticillata* seedling in siltwaters[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4): 995–1002.
- [10] 肖月娥, 陈开宁, 戴新宾, 等. 太湖中2种大型沉水被子植物适应低光能力的比较[J]. 植物生理学通讯, 2006, 42(3): 421–425.
- XIAO Yue-e, CHEN Kai-ning, DAI Xin-bin, et al. Comparison of adaptive capacity to low light intensity of two angiosperm submerged macrophytes from Taihu Lake[J]. *Plant Physiology Communications*, 2006, 42(3): 421–425.
- [11] 侯德, 孟庆义, 王利军, 等. 水植物莼齿眼子菜光补偿深度研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 690–692.
- HOU De, MENG Qing-yi, WANG Li-jun, et al. Research on compensation depth of *Potamogeton pectinatus* L.[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl): 690–692.
- [12] 杨顶田, 陈伟民, 张运林, 等. 太湖水体光学特征及其对水中初级生产力的影响[J]. 农村生态环境, 2003, 19(2): 24–28.
- YANG Ding-tian, CHEN Wei-min, ZHANG Yun-lin, et al. Effect of underwater light spectrum on primary production of the Taihu Lake[J]. *Rural Eco-Environment*, 2003, 19(2): 24–28.
- [13] Zhang Y L, Qin B Q, Hu W P, et al. Temporal-spatial variations of euphotic depth of typical lake regions in Taihu Lake and its ecological environmental significance[J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 2006, 49(4): 431–442.
- [14] 刘伟龙, 胡维平, 陈永根, 等. 西太湖水生植物时空变化[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 159–170.
- LIU Wei-long, HU Wei-ping, CHEN Yong-gen, et al. Temporal and spatial variation of aquatic macrophytes in West Taihu Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 159–170.
- [15] 乐成峰, 李云梅, 张运林, 等. 太湖水色因子空间分布特征及其对水生植物光合作用的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2491–2496.
- LE Cheng-feng, LI Yun-mei, ZHANG Yun-lin, et al. Water color parameter spatial distribution character and influence on hygrophyte photosynthesis in Taihu Lake[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11): 2491–2496.
- [16] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 第二版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- JIN Xiang-can, TU Qing-ying. Normalization for investigating lake eutrophication[M]. Second edition. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [17] 王绍华, 赵德锋, 廖日红. 关于北京后海水体的光照强度及沉水植物光补偿深度的研究[J]. 水处理技术, 2006, 32(6): 31–33.
- WANG Shao-hua, ZHAO De-feng, LIAO Ri-hong. research on water body illuminance and compensation depth of submerged macrophyte in lake[J]. *Technology of Water Treatment*, 2006, 32(6): 31–33.
- [18] Van T K, Haller W T, Bowes G. Comparison of the photosynthetic characteristics of three submersed aquatic plants[J]. *Plant Physiology*, 1976, 58(6): 761–768.
- [19] 周红, 任久长, 蔡晓明. 沉水植物昼夜光补偿点及其测定[J]. 环境科学学报, 1997, 17(2): 256–258.
- ZHOU Hong, REN Jiu-chang, CAI Xiao-ming. The concept and measurement of diurnal light compensation point of submerged macrophyte[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997, 17(2): 256–258.
- [20] 苏文华, 张光飞, 张云孙, 等. 5种沉水植物的光合特征[J]. 水生生物学报, 2004, 28(4): 391–395.
- SU Wen-hua, ZHANG Guang-fei, ZHANG Yun-sun, et al. The photosynthetic characteristics of five submerged aquatic plants[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004, 28(4): 391–395.
- [21] 叶春, 于海婵, 宋祥甫, 等. 底泥对沉水植物生长和群落结构的影响[J]. 环境科学研究, 2008, 21(5): 178–183.
- YE Chun, YU Hai-chan, SONG Xiang-fu, et al. Influence of sediment condition on growth and community structure of submerged plant[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(5): 178–183.